

Вплив шламо- та пилоутворення при обробці карбон-карбонових композитів на процес абразивного мікрорізання

О. Ф. Саленко, О. О. Ченчева, В. І. Глухова, В. Т. Щетинін,
Мохамед Р. Ф. Будар, С. А. Клименко, Є. Є. Лашко

Представлені результати теоретико-експериментальних досліджень, направлених на установлення особливостей мікрорізання абразивними зернами, що характеризується активним виділенням шламу та пилових частинок. Частинки шламу частково видаляються із зони взаємодії, а частково змінюють поверхні інструменту та оброблюваної заготовки із вуглецевих композиційних матеріалів, зокрема, вуглець-вуглецевої та вуглець-полімерної груп.

Володіючи комплексом унікальних фізико-механічних властивостей, останні знаходять застосування у високотехнологічному виробництві, водночас композити все ще залишаються важкооброблюваними матеріалами. Максимально проблеми виявляються при виконанні різних отворів, уступів, при вирізці вікон, обробленні крайок.

Дослідженням показано, що явище пило- та шламоутворення при абразивній обробці вуглецевих порожнистих композитів та пластиків уявляється наслідком ковзного руйнування та циклічного роззміцнення поверхневого порожнистого шару, який виявляє квазікрихкі властивості під дією швидкорухомих мікроінденторів. При цьому виявлена обумовленість середніх розмірів частинок шламу нормальними напруженнями в зоні різання та величиною виступання алмазних зерен над різальною поверхнею інструмента.

Оскільки встановлено, що частинки, які утворюються при різанні, лише частково видаляються за межі зони різання, і обсяг видалення зменшується зі зростанням часу обробки, зроблено висновок про причину зміни стану поверхні інструменту. Залишений шлам і бруд змінює топографію поверхні, внаслідок чого температура в зоні різання підвищується до критичних величин.

Показано, що використання інструментів із циклічною подачею дозволяє частково поліпшити умови обробки матеріалу, що є актуальним для реалізації процесів кільцевого алмазного свердлування, обробки алмазним полотном. Доведено, що зміна ділянок алмазозного шару зменшує явище налипання частинок бруду на поверхню робочого інструменту. Таким чином, інструмент довше залишається без забруднень і процес оброблення здійснюється ефективніше

Ключові слова: абразивне різання, свердлування, частота коливань, алмазне зерно, вуглецевмісний композиційний матеріал, шлам, пил

1. Вступ

Використання нових композиційних матеріалів в машинобудівних комплексах провідних країн світу неупинно зростає. Така тенденція обумовлена тим, що композити, володіючи певною сукупністю корисних властивостей, створюю-

ються переважно під готовий виріб, максимально задовольняючи вимоги до умов експлуатації або застосування у подальшому.

Володіючи фізико-механічними властивостями, що становлять інтерес для високотехнологічного виробництва – міцністю, анізотропністю, задовільною теплостійкістю, малою вагою, високою навантажувальною здатністю та ін. – композити все ще залишаються важкооброблюваними матеріалами. Максимально проблеми виявляються при виконанні різних отворів, уступів, при вирізці вікон, обробці крайок заготовок. Трудомісткість подібних операцій перевищує викладку, просочування зв'язником та формування виробу в цілому. Це пов'язано перш за все із тим, що структура композитів неоднорідна. Значна відмінність механічних властивостей його компонентів в кінцевому рахунку призводить до різкого погіршення якості крайки при спробах обробити подібні матеріали традиційним різальним інструментом. Явища деламінації, вириву армувальних волокон, деструкції крайки призводять до істотного вибракування готових виробів, що в кінцевому випадку веде до значних матеріальних втрат. Науковці зазначають, що подолати проблеми можливо кількома способами, зокрема, використанням спеціального інструменту [1], застосуванням функціонально-орієнтованого підходу при визначенні послідовності переходів на обробних операціях [2] тощо.

Обробку заготовок із композитів досить часто виконують абразивним інструментом. Оскільки матеріал являє собою нещільне компонентне середовище, процес мікрорізання абразивними зернами характеризується активним виділенням шламу та пилових частинок, які частково видаляються із зони взаємодії, а частково залишаються на поверхні алмазного шару. При цьому топографія поверхні змінюється, що веде до змін умов контакту та ковзання у зоні різання, і, відповідно, до різкого зростання температури, а у деяких випадках до практично повного унеможливлення обробки.

Отже, встановлення закономірностей явищ шламо- та пилевиділення в процесі обробки композиційних карбон-карбонових матеріалів та вплив останнього на процес мікрорізання є актуальним та важливим для розуміння особливостей взаємодії абразивного шару робочої поверхні інструменту з нещільним анізотропним середовищем матеріалу. Це дозволить запропонувати більш ефективні способи та засоби боротьби з цим явищем, а також підвищити ефективність обробки карбонових композитів в цілому.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботі [1] показано, що волокнисті композиційні матеріали (перш за все полімерні) мають низьку оброблюваність, деталі з них піддаються механічному різанню тільки спеціальним інструментом. Ці матеріали схильні до деструкції, пошкоджень і погіршення якості крайок, а також виникнення ряду інших дефектів, які можуть призвести до вибракування готового виробу.

Більш якісне оброблення (з мінімальною кількістю дефектів) можливе виключно спеціальним алмазовмісним інструментом [2]. У процесі фрезерування [2, 3] залишається невирішеною проблема стружкоутворення і подальшого перегріву робочого інструменту, оскільки робочі крайки інструмента весь час

змінюють вектор сили різання в анізотропному середовищі. Те саме стосується і свердлування [4, 5], особливо інструментом із різальними пластинами. При цьому порожнистість структури оброблюваного матеріалу, армованих вуглецевими волокнами, накладає додаткові обмеження на постановку задачі визначення раціональних умов ведення обробки. Абразивне оброблення дозволяє суттєво поліпшити якість отриманих поверхонь при різанні, однак за [6] вимагає подальшого вивчення супутніх явищ, що ведуть до виникнення дефектів поверхонь верхньої і нижньої крайок. Таким чином, і за цих умов поява різних дефектів є досить ймовірною.

В [7] показана можливість використання свердел з алмазним покриттям для виконання отворів у деталях з композиційних матеріалів. Зазначається, що неоднорідна структура матеріалів і анізотропія їх властивостей вимагають вжиття додаткових заходів щодо запобігання розшаруванню оброблюваних матеріалів і зниження ймовірності появи браку.

Автори [8] наводять результати вивчення приповерхневих пошкоджень заготовок з композиційних матеріалів на основі скляних волокон, однак умови отримання якісних поверхонь не наводяться, внаслідок того, що авторам не вдалося узагальнити закономірності дії інструменту на анізотропне середовище із вираженими пружно-пластичними властивостями. При цьому автори розглядають середовище як щільне (на відміну від порожнистих карбон-карбонових композитів, для яких ця особливість є визначальною).

В [9] автори визначали пошкодження заготовки при виході свердла з отвору при свердлуванні, пов'язавши їх із умовами силового навантаження інструменту. Однак принципово ці дослідження не відрізнялися від розглянутих вище, оскільки сам матеріал уявляли компонентним середовищем, яке не має порожнин та володіє усередненими фізико-механічними характеристиками. Також в усіх роботах задача взаємодії крайок інструмента із матеріалом розв'язувалася у квазістаціонарній постановці, без урахування супутніх явищ (зокрема, утворення стружки або мікростружки – шламу) та зміни умов взаємодії протягом робочого циклу.

Все зазначене дозволяє зробити висновок, що питання обробки вуглецевісних композиційних матеріалів нині вивчені недостатньо. Відсутність наукового підґрунтя у питаннях особливостей шламо- та пилоутворення при обробці анізотропного порожнистого середовища обумовлює необхідність проведення досліджень абразивного оброблення композитів із врахуванням супутніх явищ, зокрема, шламо- та пилоутворення. Цьому сприяє також і активний розвиток модифікацій даних матеріалів (типу КИМФ) та їх все більшого застосування в інженерній практиці.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є розвиток уявлень щодо абразивної обробки нещільних композиційних карбонових матеріалів на основі встановлення закономірностей шламо- і пилоутворення із визначенням впливу на процес різання та пошук нових, більш ефективних прийомів виконання обробки. Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- встановити закономірності явищ пило- та шламоутворення при абразивному обробленні карбонових композитів (типу КИМФ та пластиків);
- визначити вплив пило- та шламоутворення на зміну температури у зоні різання;
- визначити вплив фактору використання інструментів із циклічною подачею на умови обробки матеріалу;
- встановити вплив ефекту циклічно змінної дії окремих відмінних ділянок алмазного шару на пилоутворення та на процес обробки в цілому.

4. Матеріали та методи досліджень

У [10] розглядалися питання, пов'язані з моделюванням процесу мікрорізання нещільного матеріалу. Такими матеріалами є переважно карбон-карбонові матеріали (рис. 1, *а*), хоча й армовані пластики інколи мають значні порожнини (рис. 1, *б*).

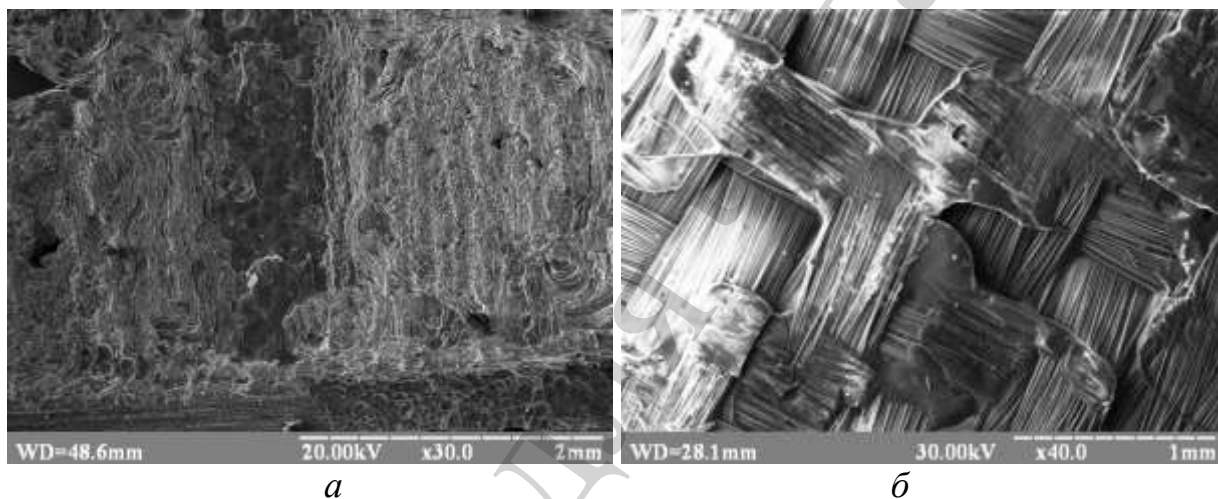


Рис. 1. Структура досліджуваних матеріалів: *а* – вуглець-вуглецевий матеріал КИМФ; *б* – склопластик СВА

Опис явищ пило- та шламоутворення як наслідку переривчастого контакту робочих зерен витікає з уявлення матеріалу у вигляді сукупності подібних структурних зон, опис яких здійснюється на основі початкового структурного елементу композиту (ПСЕ). Нехай такий елемент являє собою тіло діаметром d_v , на поверхні якого розташований шар s_{pv} матриці, та шар s_{pp} порожнини (рис. 2).

Залежно від розташування на поверхні інструменту, зерна виступатимуть різальними та контактними. Торцева поверхня, яку на макорівні можна уявити у вигляді переривчастого поверхневого шару з кроком порожнин t_p , що визначається як $t_p = d_v/2 + s_{pp} + s_{vv}$, сприймає навантаження від одиничних різальних зерен. За [11], таку взаємодію можна представити як стрибкоподібне заглиблення конічного індентору під дією осьової P_z на глибину h , внаслідок чого виникає відколювання з кутом сколювання β , після чого прикладається тангенціальна сила P_y . На початку відбувається ковзання індентора уздовж твірної конуса вгору під дією складової t до моменту часу, коли сила P_z буде достатньою, щоб

зруйнувати шар глибиною h_1 . При цьому індентор долає сили тертя між сколами і основним матеріалом. Величина ковзання індентору визначається радіусом округлення одиничного зерна. Взаємодія алмазного зерна з поверхнею оброблюваного матеріалу при відношенні глибини заглиблення h до радіусу округлення ріжучого вістря r менше 0,01 характеризується пружним відтискуванням матеріалу, тобто відсутністю його знімання.

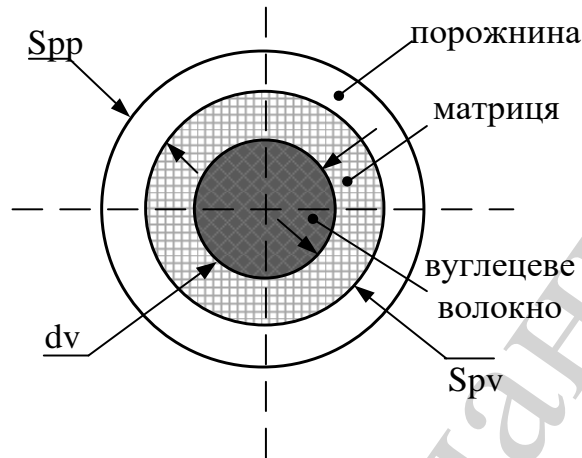


Рис. 2. Початковий структурний елемент

Тож можна вважати, що своєму русі зерно абразиву послідовно взаємодіє з компонентами ПСЕ.

При дії нормальної сили в місці контакту напруження визначаються відповідними формулами Герца, які для випадку контакту абразивного зерна з округленням r_1 та радіусу r_2 жорсткої компоненти (джгута волокон) відповідно до уяви ПСЕ становитимуть:

$$\sigma_k = \frac{m_p P_z^{1/3} E^{2/3}}{r^{2/3}},$$

де $m = 1 + \frac{r_1}{r_2}$, E – приведений модуль пружності:

$$E = \frac{2E_1 E_2}{E_1 + E_2},$$

де r – приведений радіус контакту: $\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$.

Контактні зерна, розташовані переважно на бічній поверхні, взаємодіють із поверхнею за рахунок пружного відтискання джгутів волокон, які відновилися після дії різального зерна.

Оскільки межа міцності волокон набагато перевищує створювані різальним зерном напруження, можна припустити, що волокна, які виходять на поверхню та зв'язані з основою матриці, руйнуватимуться за механізмом розкриття мікротріщини по площинах адгезії.

Руйнування структури матеріалу і виникнення шламу відбувається як за рахунок ковзного мікрорізання матриці (піровуглецю), так і за рахунок прояву механізмів малоциклового розміцнення з наступним вирином фрагментів мікрОВОЛОКОН армувальника.

Частота навантаження елементів поверхні, що визначається параметрами різального шару, структурою ПСЕ, становить: $\omega = \frac{\pi D}{\frac{d_v}{2} + s_{pp} + s_{pv}} n$, де D – діаметр використовуваного інструменту, n – частота обертання. При цьому коефіцієнт інтенсивності напружень становитиме: $k = \sigma_k + \left(\frac{b-l}{b}\right) \frac{3M_f}{2b^2} \cos \omega t \sqrt{\pi a}$, де a – половина довжини відкритої тріщини, M_0 – момент збурення, b і l – геометричні параметри мікротріщини.

Спираючись на закономірності вивільнення пружних деформацій, за [9], а також на дані роботи [10], очікувана максимальна довжина тріщини a_c після певного циклу навантажень N становитиме:

$$a_c = \frac{a_0}{\sqrt[n/2-1]{1 - \frac{\pi C D n t}{\left(\frac{d_v}{2} + s_{pp} + s_{pv}\right) K}}}, \quad (1)$$

де

$$C = a_0^{n/2-1} \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^n \left(\frac{\rho}{\bar{c}}\right)^n,$$

$$K = \frac{1}{\sqrt{\pi(n/2-1)}},$$

a_0 – початкова довжина тріщини; ρ – густина матеріалу; n , \bar{c} – константи матеріалу; σ – мікронапруження у верхівці тріщини. Відокремлення частинки матеріалу (джгута волокон, піровуглецевої матриці) відбуватиметься при перевищенні виниклих критичних напружень міцності того чи іншого компонента композита, а очікувані розміри такої частинки – a_c , тобто $d_p \sim a_c$.

Частинки, які утворилися при різанні (кількістю I_u), будуть видалятися із зони різання (I_l) та частково осідати на поверхні різальних крайок (I_o): $I_u = I_l + I_o$. При цьому їх загальний обсяг становитиме W_s , а розподіл між вилученням із

зони різання W_p , потраплянням до порожнин матеріалу W_r , та на поверхню інструменту в міжзеренні порожнини W_i відповідатиме:

$$W_s = W_p + W_r + W_i. \quad (2)$$

Кількість I_u визначається структурою матеріалу, топографією алмазного шару та режимами обробки.

Закономірності виносу частинок із зони різання обумовлюються рухом робочих поверхонь інструменту (обертowego та зворотно-поступального), геометрією робочої частини та робочого зазору. Частинки матеріалу, що залишилися після зрізання на контактуючих поверхнях, обумовлюватимуть зростання площі контакту, контактних напружень і температури у зоні різання.

При цьому чим вища температура, тим активніше частинки будуть налипати на поверхню, створюючи міцний спечений шар. Причина полягає у тому, що під дією високих температур піровуглець матриці (особливо низькотемпературний, отримуваний при температурах піролізу біля 800 °C) активно руйнується на окремі фрагменти, диспергує і під дією тиску проникає у порожнини поверхні інструменту. Тож іншим чинником, що впливає на винесення частинок із зони різання, є температура T на робочих поверхнях інструменту.

Для розгляду рівноваги частинок, утворених у зоні різання, доцільно навести сили, що діють на частинки на торці та в периферійній зоні (рис. 3).

На відокремлені частинки шламу та пилу, що знаходиться в міжторцевому зазорі, діють такі сили:

$$\vec{F} = \vec{P} + \vec{F}_a + \vec{F}_v + \vec{F}_z + \vec{F}_t + \vec{F}_k,$$

де P – сила тяжіння; F_a – аеродинамічна сила; F_v – відцентрова сила; F_z – сила адгезійного зчеплення, Н; F_t – сила тертя частинки по поверхні, F_k – сила контактної взаємодії. У першому наближенні аеродинамічна сила F_a уявляється як сила дії потоку повітря у зазорі з урахуванням нерівномірності швидкості його руху у приповерхневій зоні, отже, з урахуванням [10] може бути встановлена так:

$$F_a = \rho c S \frac{u^2}{2} + \rho_c \frac{\pi r^3}{2} u \frac{du}{dz},$$

де c – коефіцієнт лобового опору частинки шламу; ρ – щільність повітря; ρ_c – щільність матеріалу частинки; r – радіус частинки; S – площа перетину частинки; u , $\frac{du}{dz}$ – середня швидкість повітряного потоку та його градієнт за віссю z .

Частинки можуть взаємодіяти між собою з утворенням окремих конгломератів або прилипають до поверхні за рахунок явища адгезії. Сила адгезії становить:

$$F_z = 2.4 \cdot 10^{-7} r,$$

де r – радіус частинки. Відцентрова сила визначається як: $F_v = m\omega^2 R_i$, де R_i – радіус траєкторії руху частинки, ω – кутова швидкість, m – маса частинки, а сила тертя між частинкою та площиною становить: $F_t = \mu F_k$.

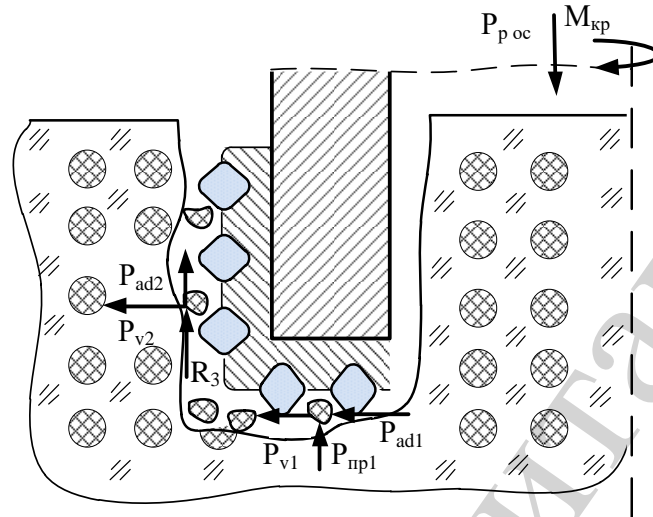


Рис. 3. Сили, що діють на частинки на торці та в периферійній зоні

Сили контактної взаємодії визначатимуться з умови, що частинки після відокремлення мають певний вектор швидкості, направлений по дотичній до радіусу знаходження частинки біля зерна.

Нехай інструмент, окрім обертового, здійснює і зворотно-поступальний циклічний рух.

Відповідно до закону збереження імпульсу та із умови, що контакт між абразивною частинкою і частинкою шламу триває t с, маємо:

$$F_u = \frac{mv}{t},$$

де $t=A/v_v$, A – амплітуда коливань інструменту у вертикальній площині; v_v – швидкість вертикального переміщення інструменту. Тоді, відносячи сили на відповідні координатні осі, маємо змогу скласти диференційні рівняння поведінки окремих частинок у торцевому та периферійному зазорах.

Диференційні рівняння рівноваги частинок у проекціях на осі r та z відповідності до принципу Д'аламбера матимуть вигляд:

$$m_p \frac{d^2 r}{dt^2} = \sum F_{ri},$$

$$m_p \frac{d^2 z}{dt^2} = \sum F_{zi}.$$

(3)

При русі у зазорі між торцем інструменту та поверхнею різання в горизонтальній площині на частинку шламу діятиме відцентрова сила, а також сила контактної взаємодії, сила тертя та адгезії. При цьому силами аеродинамічного навантаження можна знехтувати.

На частину в периферійному зазорі система сил включатиме аеродинамічну складову, силу тертя, силу контактної взаємодії, адгезію, вагу частинки. Умови переміщення частинок такі. Для торцевого зазору: рух уздовж осі OR : $F_v - F_a - F_t - F_z > 0$; умова виносу частинок із периферійного зазору уздовж осі OZ матиме такий вигляд: $F_u - F_v - F_a - F_t - mg - F_z > 0$.

Рух повітря у зазорі при зворотно-поступовому русі інструменту у першому наближенні отримаємо із течії Куєтта, тобто:

$$\mu \frac{d^2 u_r}{dz^2} - c_1 = 0.$$

Тож матимемо наступну систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \frac{d^2 r}{dt^2} &= m \omega^2 R_i - 2,4 \cdot 10^{-7} r - \mu_p mg - \left(\rho c S \frac{u_z^2}{2} + \rho_c \frac{\pi r^3}{2} u_z \frac{du_z}{dz} \right); \\ \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \frac{d^2 z}{dt^2} &= \frac{mv(\cos(\omega t))}{t} - m \omega^2 R_i - 2,4 \cdot 10^{-7} r - mg - \left(\rho c S \frac{u_r^2}{2} + \rho_c \frac{\pi r^3}{2} u_r \frac{du_r}{dz} \right); \\ \mu \frac{d^2 u_r}{dz^2} - c_1 &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Для визначення температури T в зоні різання необхідно розглянути тепловиділення на поверхнях контакту. Зерно, рухаючись в масиві матеріалу, здійснює роботу руйнування на довжині контакту l_p . Одночасно внаслідок відновлення зрізаного шару інструмент контактує із заготовкою периферією, а також торцями, що дає змогу визначити тепловий баланс так:

$$Q_p + Q_{tr} + Q_{tl} = Q_k + Q_i + Q_a, \quad (5)$$

де Q_p – тепловиділення на периферії інструменту; Q_{tr} , Q_{tl} – тепловиділення на правому та лівому торцях відповідно; Q_k – теплопоглинання у матеріал; Q_i – теплопоглинання в інструмент; Q_a – втрата тепла в навколишнє середовище та у шлам.

Вважаємо, що робота зовнішніх сил у зоні різання розподіляється на роботу руйнування та роботу сили тертя. Якщо взяти до уваги, що остання повністю перетворюється у теплоту, то інтенсивність тепловиділення на підставі [7] складе:

$$q = fpv, \quad (6)$$

де f – коефіцієнт тертя (для карбону за умови лінеаризації на великих швидкостях $f=0,18$); p – контактний тиск; v – швидкість ковзання.

Автори роботи [12] зазначають, що контактний тиск визначається співвідношенням сили нормального навантаження F до площадки контакту s_k . При дії нормальної сили у місці контакту напруження можуть бути визначені за відповідними формулами Герца, які для випадку контакту абразивного зерна (уявленого у вигляді сфери радіусом r_1) та джгута волокон радіусом r_2 становитиме:

$$\sigma = \frac{mF^{1/3}E^{2/3}}{r^{2/3}},$$

де $m = 1 + \frac{r_1}{r_2}$, E – приведений модуль пружності:

$$E = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2},$$

r – приведений радіус контакту:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}.$$

Оскільки при обробці композиційного матеріалу пористої структури контакт зерен не є постійним, час контакту (і, відповідно, інтенсивність тепловиділення) визначатиметься щільністю плетіння армувальника композита, щільністю шару, що містить абразив (алмази) та швидкістю відносного руху.

З геометричних міркувань та за умови, що зрізання частини волокна відбуватиметься лише при виступанні волокна над поверхнею на величину ψ , максимальна довжина контакту становитиме $l_k = 2\sqrt{r_2^2 - (r_2 - \psi)^2}$. Одночасно в зоні обробки буде відбуватися N контактів, отже приведена довжина контакту складе $l_p = Nl_k$, м. Тоді час контактної взаємодії, що визначатиме виділення теплоти, дорівнюватиме

$$\tau = \frac{2N\sqrt{r_2^2 - (r_2 - \psi)^2}}{\pi D_k n}.$$

Частота виникнення зон тепловиділення визначиться співвідношенням:

$$\varphi = \frac{\pi D_k n}{l_k}. \quad (7)$$

Малі зони тепловиділення отримують теплоту від контактної взаємодії (рис. 4). Для них задача визначення розподілу температурних полів зведена до задачі імпульсного нагрівання поверхні точковим джерелом. Визначення температури на поверхні нагріву розглянуто у [13].

Диференціальне рівняння теплопровідності в стаціонарному середовищі, яке не передбачає конвекції або випромінювання, має вигляд:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = \frac{1}{\rho C} \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (8)$$

Тобто для певного тіла маємо наступну зміну температури:

$$dT(x, y, z, t) = \frac{\delta q}{\rho C (4\pi\alpha(t-t'))^{3/2}} \exp \left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4\alpha(t-t')} \right]$$

для точки з координатами (x, y, z) за час t у разі, якщо тепло δq миттєво надійде до точки поверхні, що має координати (x', y', z') та час t' ; C – теплоємність, α – дифузійність, ρ – густина, K – теплопровідність.

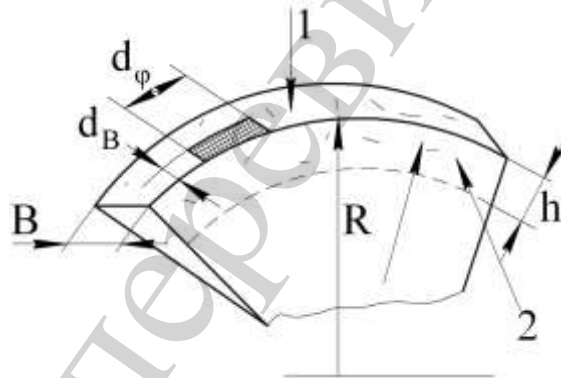


Рис. 4. Розрахункова схема тепловідведення в інструмент

В напівскінченному тілі зміна температури відбуватиметься дещо іншим чином:

$$dT(x, y, z, t) = \frac{\delta q}{\rho C (4\pi\alpha(t-t'))^{3/2}} \exp \left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{4\alpha(t-t')} \right] \times \left[\exp \left[-\frac{(z-z')^2}{4\alpha(t-t')} \right] + \exp \left[-\frac{(z+z')^2}{4\alpha(t-t')} \right] \right],$$

якщо тепло вивільняється зі швидкістю $dQ=Pdt'$ від $t=t'$; до $t=t'+dt'$ у точці (x', y', z') , температуру при (x, y, z) в момент часу t знаходимо, інтегруючи попереднє рівняння:

$$dT(x, y, z, t) = \frac{Pdt'}{\rho C (4\pi\alpha(t-t'))^{3/2}} \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4\alpha(t-t')}\right].$$

Тепер, якщо джерело тепла від часу $t'=0$ до $t'=t$ безперервне, воно може бути записане як:

$$dT(x, y, z, t) = \int_{t'=0}^{t'=t} \frac{Pdt'}{\rho C (4\pi\alpha(t-t'))^{3/2}} \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4\alpha(t-t')}\right],$$

де Q у Вт.

Коли $t \rightarrow \infty$, відбуватиметься стаціонарний розподіл температури, заданий формулою:

$$T(x, y, z) = \frac{P}{4\pi k \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}}.$$

Такий розподіл температур характерний для імпульсної дії джерела тепла.

Рівняння, яке описує одномірне температурне поле відносно периферії інструменту, отримане на основі розв'язку диференціального рівняння

$$q = q_0 A = -\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x}(0, t):$$

$$T(x, t) = \frac{2q\sqrt{\alpha_T t}}{\lambda_T} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T t}}\right). \quad (9)$$

Після припинення дії імпульсу теплового джерела тривалістю τ на поверхню, що нагрівається, відбувається її остигання за рахунок перерозподілу підведеного тепла. Одномірне температурне поле за умови, що оброблюване тіло являє собою напівнескінченний простір, може бути встановлене так:

$$T(z, t) = \frac{2Aq_0\sqrt{\alpha_T}}{\lambda_T} \left[\sqrt{t} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T t}}\right) - \sqrt{t-\tau} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T (t-\tau)}}\right) \right]. \quad (10)$$

При цьому температура поверхні складе

$$T_0(t) = \frac{2q\sqrt{\alpha_T t}}{\lambda_T}.$$

Отже, з урахуванням закономірності зростання температури та зміни активності частинок шламу по відношенню до поверхні інструменту, рівняння (2) набуде вигляду:

$$W_s = W_p + W_r + W_i(T). \quad (11)$$

Якщо обробка здійснюється циліндричним інструментом діаметром D_s з плоским торцем, перпендикулярним

$$K_i = \frac{\left[\frac{\pi(D_z - D_v)n}{l_k} \right] w_s \tau - W_r - W_i(T)}{4 \left[\frac{\pi(D_z^2 - D_v^2)}{4} \left(l_p + \frac{A}{2} \right) - \eta \frac{4\pi r_a^3}{9} \right] \sin \omega \tau + \left[\pi D_z A M(l_p) - \eta \frac{4\pi r_a^3}{9} \right] \sin \omega \tau}.$$

до осі циліндру, для якого щільність укладення алмазних зерен η на поверхні інструменту така, що разом вони зрізують шар матеріалу при повороті циліндру на кут α , теоретичний обсяг вилученого матеріалу W_s становитиме:

$$W_s = f(t) = \left[\frac{R_1^2(\alpha - \sin(\alpha))}{4} + vt \right] 19. \quad (12)$$

де 9 – щільність матеріалу (оскільки вважаємо, що оброблюване середовище не є щільним).

Таким чином, для визначення W_s використовуємо рівняння (11), для W_p – систему рівнянь (4) та рівняння обмежень за температурою (10). Оскільки частинки знаходяться у порожнині між поверхнею різального інструменту і площиною різання, важливою характеристикою є концентрація частинок, як відношення їх кількості до об'єму порожнини. Для інструменту, що здійснює обертовий і зворотно-поступальний рух, цей об'єм визначиться так. За час τ повороту на кут 2π інструмент здійснить M подвійних ходів із амплітудою A . Тоді між торцевими поверхнями утвориться зазор, обсяг якого можна визначити як

$$W_t = \left[\frac{\pi(D_z^2 - D_v^2)}{4} \left(l_p + \frac{A}{2} \right) - \eta \frac{4\pi r_a^3}{9} \right] \sin \omega \tau,$$

а на периферії

$$W_b = \left[\pi D_z A M(l_p) - \eta \frac{4\pi r_a^3}{9} \right] \sin \omega \tau.$$

Якщо частинки шламу уявити у вигляді кульок радіусами r_s , їхня об'ємна концентрація, з урахуванням частоти контактів зерен (7) із поверхнею, внаслідок чого виникатимуть частинки шламу, становитиме:

$$K_i = \frac{\left[\frac{\pi(D_z - D_v)n}{l_k} \right] w_s \tau - W_r - W_i(T)}{4 \left[\frac{\pi(D_z^2 - D_v^2)}{4} \left(l_p + \frac{A}{2} \right) - \eta \frac{4\pi r_a^3}{9} \right] \sin \omega \tau + \left[\pi D_z A M(l_p) - \eta \frac{4\pi r_a^3}{9} \right] \sin \omega \tau}. \quad (13)$$

де D_z, D_v – зовнішній та внутрішній діаметри інструменту відповідно, n – частота обертання інструменту, τ – плинний час w_c – обсяг частинки.

Зростання цього параметру вестиме до зростання температури у зоні різання і зниження продуктивності процесу.

Для перевірки теоретичних посилок стосовно впливу параметрів зони контакту на ефективність та якість отриманого поверхневого шару при обробці матеріалів типу КИМФ (властивості якого подано у табл. 1) алмазним інструментом та встановлення теплового режиму скористалися верстатом FDB Maschinen GYQ400B/220.

Таблиця 1
Механічні властивості ВВКМ типу КИМФ

Об'ємна (уявна) густина, не менше, г/см ³	1,7 г/см ³ , (фактична не менше 1,78 г/см ³)
Руйнівне напруження кг/см ² при стиску по осях армування $X(Y)$, не менше	1200 (фактичне не менше 1700)
Руйнівне напруження кг/см ² при розтягуванні по осям армування, $X(Y)$, не менше	240 (фактичне не менше 600)
Руйнівне напруження при зрізі, МПа, не менш	24,5
Руйнівне напруження при вигині, МПа, не менш	88,2
Коефіцієнт теплопровідності (при температурі 50 °С), ккал/м год, град	7
Модуль пружності при стиску по осях армування $X(Y)$, МПа, не більше	$2,45 \cdot 10^4$
Пористість матеріалу, %	×8,7
Ударна в'язкість, КДж/м ³	×10
Питомий електроопір, Ом×мм ² /м	30

Обробку виконували алмазним кільцевим свердлом Ø18,0 мм (табл. 2). Дослідження поверхневого шару, а також вивчення одержуваного шламу виконувалося на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106-І. Зразки готувалися з карбон-карбонівих матеріалів регулярного плетіння. Різання здійснювали з режимами, рекомендованими виробником інструменту для обробки каменю. Температуру в зоні різання вимірювали пірометром Maurer Digital Infrared – Pyrometer Series KTRD 1065, обробку результатів проводили з використанням спеціального програмного забезпечення Maurer IR-LOG. Сили різання в зоні контакту визначали за допомогою тензометричного перетворювача ZEMIC BM3-C3-0,2-3В, підключеного до АЦП М-DAQ з роздільною здатністю 2,0 Н і записом в файл EOM.

Таблиця 2
Зразки використовуваних свердел середніх діаметрів

№	Свердло та його параметри	Призначення
1	<p>Свердло кільцеве</p>  <p>$D=14-24$ мм; c – глибина знаходження отворів; $d6$; b – ширина; $d2$, $d3$, $d4$, $d7$ – розмір конструктивних елементів. Зерна: 160/125</p>	Свердлення отворів Ø14,0–Ø24,0 мм
2	 <p>$D=18,0$ мм, алмазний шар із регулярними розвантажувальними смужками</p>	Свердлення отворів Ø18,0 мм у вуглецевих матеріалах

Визначення впливу ступеня забруднення поверхневого шару інструменту здійснювали шляхом зважування зразків прецизійними вагами типу RADWAG із ціною поділки 0,0001 г та межею визначення ваги до 150,000 г.

При цьому брали до уваги, що коли кількість речовини становитиме W_i^{\max} :

$$W_i^{\max} = 3\pi D_k h \delta - \frac{2}{3} \pi r_a^3 N,$$

де N – кількість зерен абразиву; r_a – радіус абразивного зерна, який умовно вважатимемо півсферою, контакт круга буде відповідати контакту диску із поверхнею при відсутності роботи руйнування.

Вивчення дисперсності та виду отриманого при абразивному різанні шламу виконували засобами растрової мікроелектронної мікроскопії.

З цією метою після обробки заготовок були підготовлені препарати для мікроелектронного дослідження як отримуваних поверхонь, так і шламу матеріалу (мікростружки) після обробки. Зразки були наклеєні на струмопровідну фольгу та витримані при температуру $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ у вакуумній камері ВУП-5 на низькому вакуумі (1,0–2,0 Па) протягом 12 год. Після цього зразки встановлювали на предметний столик мікроскопу, забезпечуючи надійний електричний контакт для відведення електронного потенціалу з предметного столику. Для оцінювання впливу параметру S_p на процес виносу шламу було проведено мікроелектронне дослідження поверхні різального інструменту – трубчастого свердла $\varnothing 18,0$. Для визначення величини вильоту зерен скористалися профілометром типу TL-90.

5. Результати експериментальних та модельних досліджень процесу алмазного мікрорізання карбон-карбонівих композитів

5.1. Пило- ташламоутворення при абразивному обробленні вуглецевих композитів (типу КИМФ та пластиків)

Контроль поверхні різального інструменту (алмазного шару) довів (рис. 5, *а*), що алмазні зерна виступають над поверхнею на висоту 0,02–0,18 мм. Середнє значення становить 0,12 мм, і в цілому розсіювання виступу верхівки над поверхнею підкоряється закону нормального розсіювання. На поверхні різальних крайок інструменту (рис. 5, *б*) спостерігаються окремі алмазні зерна фракцією 150/200 мкм; щільність викладання таких зерен становить 250–300 од/см². Алмазний шар не є рівним, що можна пояснити особливостями технології закріплення алмазів у зв'язці.

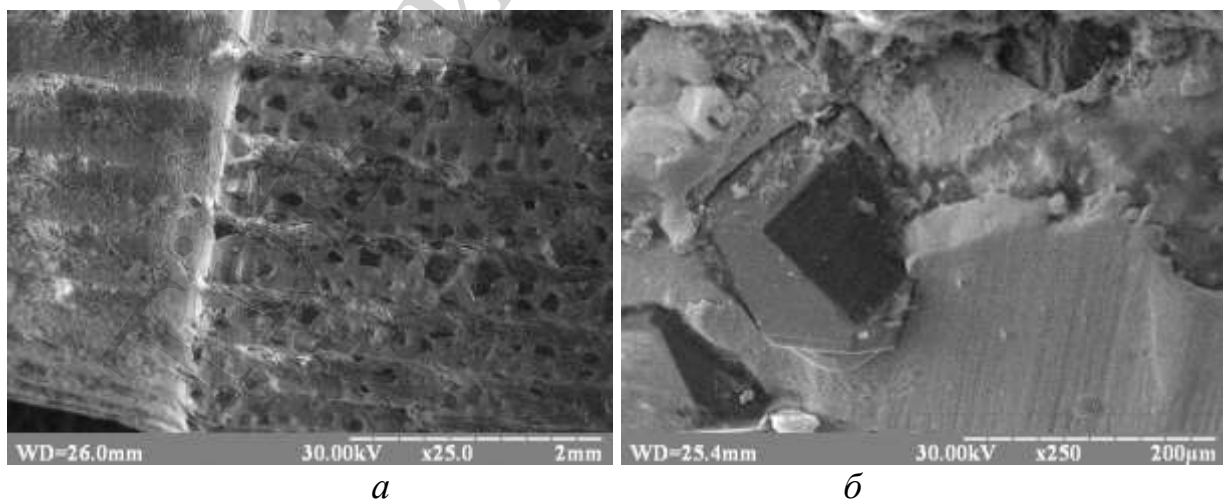


Рис. 5. Мікроелектронні фотографії поверхні алмазовмісного трубчастого свердла: *а* – зі збільшенням $\times 25$; *б* – зі збільшенням $\times 250$

Для визначення дисперсності та середнього розміру частинок і моделювання процесів виносу шламу скористалися програмним забезпеченням обробки растру та автоматичним генеруванням площі відповідного контрасту, що дозволило визначити розміри частинок шламу за мікро- та мікроелектронною фотографією зразків. Тоді, кількість замкнених контурів відповідатиме кількості частинок, а відмінні за яскравістю поля визначатимуть наявність частинки чи підкладки. Існування кількох концентричних контурів (наприклад, якщо досліджувана частинка має поверхневі порожнини, виступи тощо), нівелюється введенням відповідних коректорів та масок зображення. Умовою точності розрахунку є одношарове викладення частинок для дослідження.

Це дозволило встановити геометричні параметри прийнятого до уваги ПСЕ (рис. 2). Так, джгут вуглецевих волокон, який уявляється ядром ПСЕ, має діаметр $d_v=1,57-1,72$ мм; полімерна матриця вкриває джгут шаром $s_{pp}=0,35-0,55$ мм; товщина проміжного шару з повітряними порожнинами становить $s_{pv}=0,18-0,22$ мм.

За аналізом електронних мікрофото було доведено квазікрихий характер руйнування компонентів композиту та виокремлено частинки полімерної матриці, фрагменти зламаних волокон і конгломератів, для яких тріщини розвилися до критичного розміру. Порівняння шламу за фракційним складом доводить, що шлам бічних поверхонь (рис. 6, *а*) дрібнодисперсний, однорідний, із середнім розміром частинок 40/80 мкм; шлам із торцевої частини свердла більший (рис. 6, *б*), його фракційність складає 120/160 мкм. При цьому в шламі присутні окремі фракції зрізаних вуглецевих волокон та матриці. Тож можна зробити висновок, що частинки, рухаючись у міжповерхневих зазорах, зазнають значних змін форми, відбувається їх дроблення, внаслідок чого кількість дрібнодисперсних складових зростає.

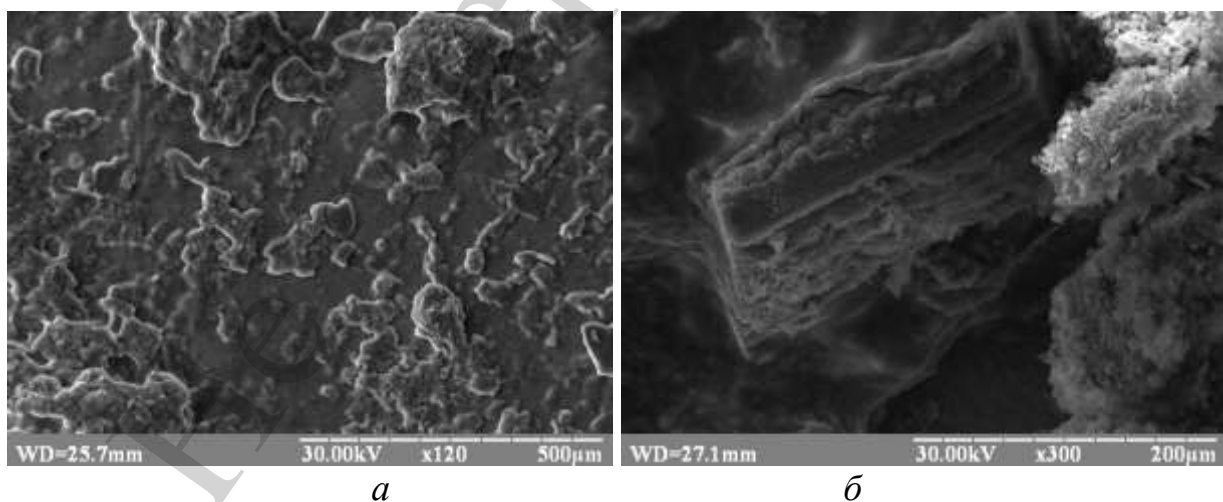


Рис. 6. Мікроелектронні фотографії шламу в зоні різання: *а* – шлам із бічної поверхні; *б* – шлам із торця інструменту

Доведено, що характерний розмір частинок (наприклад, довжина l_z або більший розмір) обумовлюється:

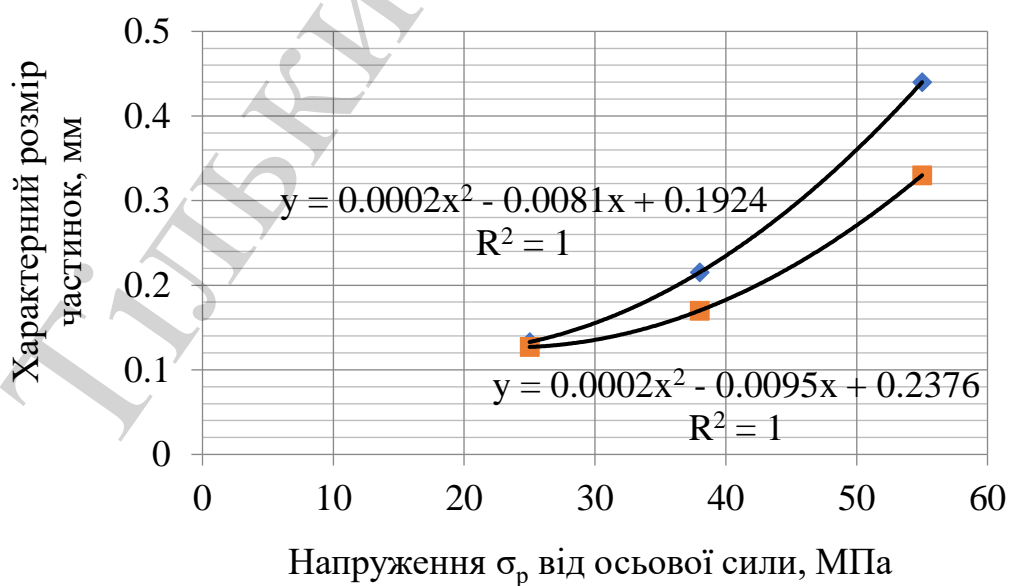
- 1) орієнтуванням армувальних волокон відносно прикладеного зусилля;
- 2) розмірами виступаючої частинки абразивних зерен;
- 3) напруженнями у поверхневому шарі σ_0 , обумовленими зусиллям осової подачі P .

Найбільш істотно на розмір частинок шламу має силовий вплив на оброблюваний матеріал (рис. 7, *а*), який обумовлює виникаючі напруження у поверхневому шарі σ_p . Можна очікувати, що збільшення прикладеної осової сили викликати відповідне зростання напружень на поверхні контакту і відбуватиметься сколювання окремих волокон та їх конгломератів. З приведеної діаграми видно, що перевищення напружень понад 40 МПа значно підвищує розмір частинок шламу. Виходячи із фізичної моделі утворення поверхні одиничним зерном, можна зробити висновок, що зростатиме і шорсткість поверхні. Дані результати відображені в роботі [10].

Вплив орієнтування волокон на фракційність шламу не є істотним в межах напружень 15–40 МПа, орієнтування волокон під кутами, що наближаються до $\pi/4$ веде до зменшення фракційності шламу на 20–35 %.

Величина консолі виступаючої частини алмазного зерна практично лінійно змінює очікувану фракційність шламу (рис. 7, *б*): зменшення вильоту до 0,08 мм змінює мікронапруження у верхівці та впливає на розвиток сітки мікротріщини. Тріщини починають зростати активніше, з утворенням частинок розмірами 0,08–0,12 мм.

Таким чином, стає зрозумілим, що наявність порожнин у матеріалі відіграє важливу роль в процесі його руйнування абразивними частинками. Так, збільшення сили, прикладеної до інструменту, викликає більші локальні деформування прилеглих до порожнини ділянок. Як наслідок, волокна починають відокремлюватися від матриці, із наступним розміщенням усього навколопорожнинного простору.



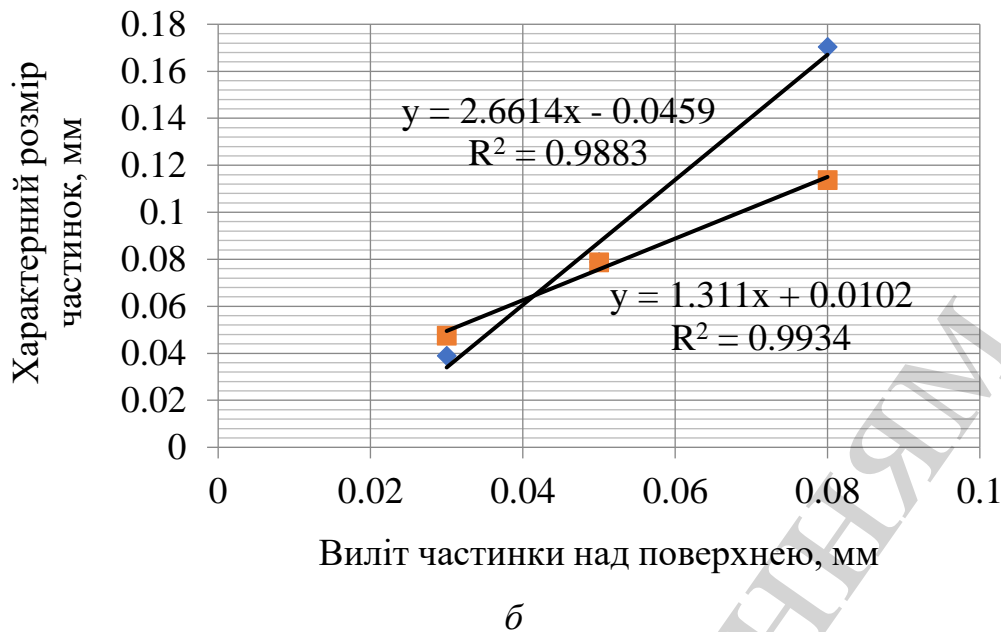


Рис. 7. Обумовленість розмірів частинок: а – напруженнями від дії навантаження, орієнтованого по нормалі до поверхні; б – виступаючою частиною абразивних зерен

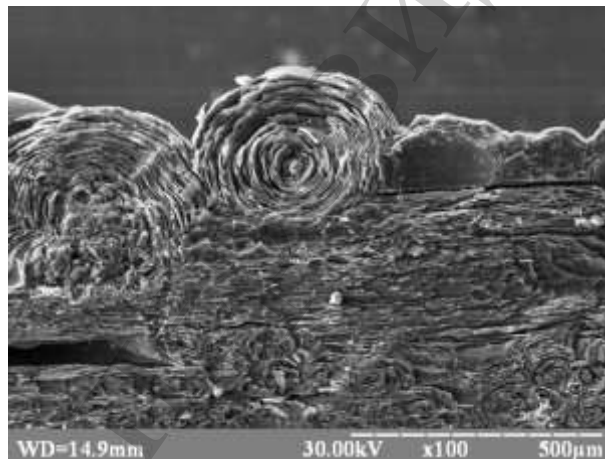


Рис. 8. Фрагмент навіколопорожнинної ділянки із виниклою мікротріщиною

Наслідком такого роззміцнення є активне тріщиноутворення по площинам адгезії. Це дещо змінює сприйняття компонентами матеріалу силового навантаження: тепер мова йде про те, що волокна виключені із матриці, отже, відбувається їх руйнація шляхом зламів на більшій довжині. Матриця у цьому випадку вже не є міцним сполучником.

5. 2. Зміна температури у зоні різання при активному шламоутворенні

Аналіз проводили для випадку обробки кільцевими свердлами традиційного виконання (із рівномірним нанесенням алмазного шару на поверхню різання) та для випадку обробки свердлами з профільованим шаром (рис. 9). Моделю-

вання температурних полів виконували для випадку контакту інструменту із оброблюваною заготовкою, виходячи із такого [14]:

- матеріал свердла однорідний, з одношаровим нанесенням алмазів методами гальваностегії або лазерного деформаційного припікання;
- оброблювана заготовка контактує з інструментом точками дотику алмазів, однак площа контакту залежить від інтенсивності шламоутворення, обумовленого процесом мікрорізання;
- шлам міцно з'єднаний із основою, за час моделювання умови контакту не змінюються.

Зростання температури оцінювалося за (10) із дискретою часу $t=0,5$ с при умові що $z=0,1$ мм. Результати подані на рис. 10.

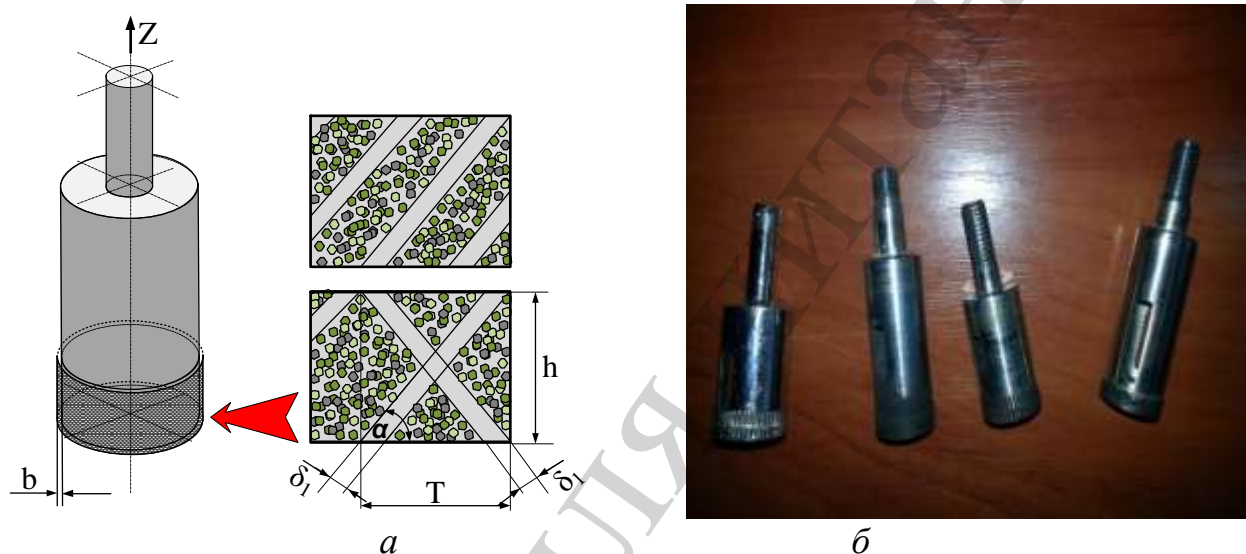


Рис. 9. Свердла, використовувані для дослідження: *а* – схема; *б* – вигляд

Із картин розподілу температури стає зрозумілим, що зі зростанням часу понад 2–2,5 с температура на поверхні контакту починає сягати критичних значень (понад 600–700 °С), а, отже, зростання плям контакту буде відбуватися прогресуюче.

Зростання температури змінює і фракційність пилу. Так, на рис. 11 приведено приклади утворених конгломератів шламу, які ущільнюються зі зростанням температури.

Тож можна зробити висновок, що зростання температури веде до утворення конгломерованих частинок шламу, розміри яких можуть значно перевищувати очікувані та розраховані теоретично. У той же час кількість дрібних частинок, які утворюються у прогресуючій кількості, в цілому відповідає розрахункам за рівнянням (13).

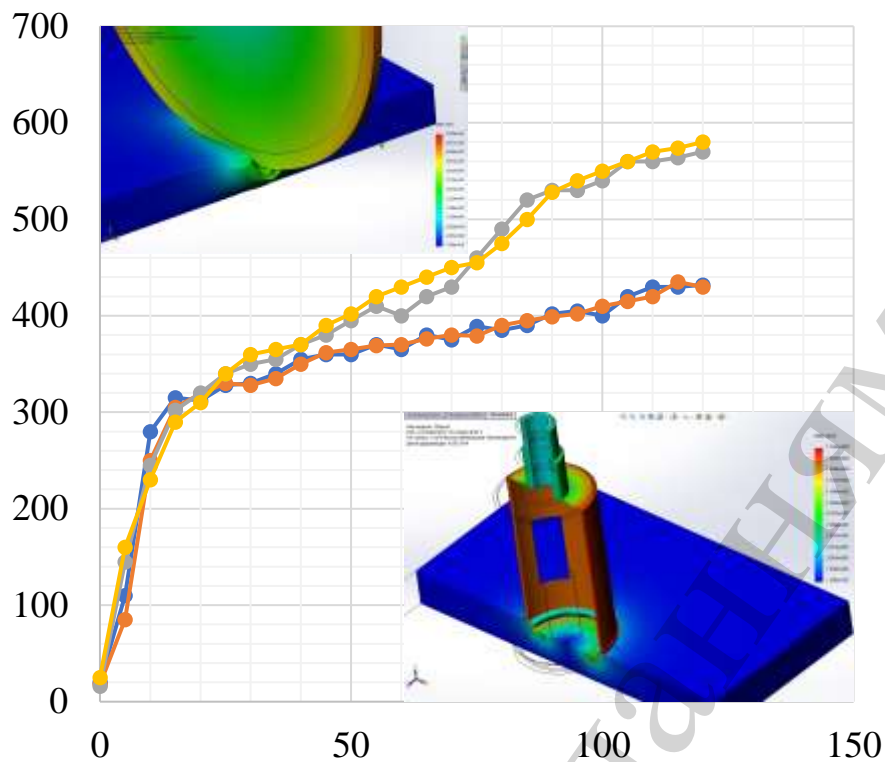


Рис. 10. Зростання температури в поверхневому шарі із плином часу при обробці різними абразивними інструментами

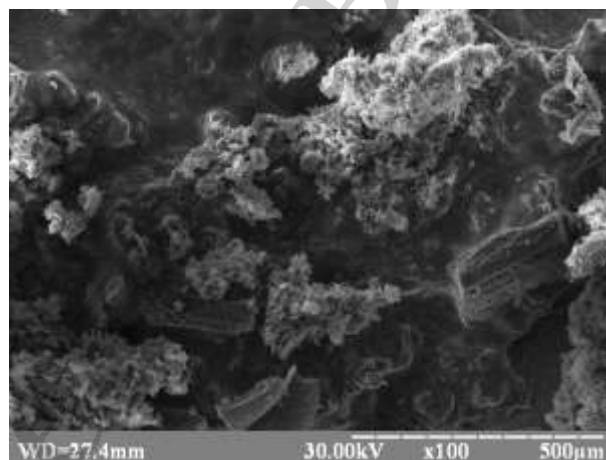


Рис. 11. Частинки та конгломерати волокон із залишків сполучного

5. 3. Вплив фактору циклічного навантаження інструменту на явища

Зазвичай для підвищення ефективності обробки використовують додаткові впливи на інструмент, наприклад, осьове навантаження свердел, нормальне навантаження пилок реноватору або шпинделя абразивного круга тощо. Нами встановлено, що частота коливань робочого інструменту безпосередньо визначає дисперсність шламу.

Так, вібрація торця робочого органу в частотному діапазоні 40–600 Гц має вести до появи виключно дрібнодисперсного шламу, оскільки з (1) тріщини перестають розвиватися і біфуркують з утворенням дрібнодисперсних частинок.

Однак експериментальні дослідження довели, що застосування низькочастотного навантаження крайки робочого органу (в діапазоні частот 20–50 Гц) викликає появу досить істотних шламових частинок, характерний розмір яких можна очікувати на рівні 0,18–0,27 мм. Оскільки частота має зворотній вплив, а джгути волокон можуть значно розпушуватися без матриці, такі частинки можуть утворюватися переважно із сполучного. Тож маємо, що зростання частоти вібрування робочої поверхні інструменту по нормалі до оброблюваної поверхні веде до зменшення розмірів частинок шламу (рис. 12).

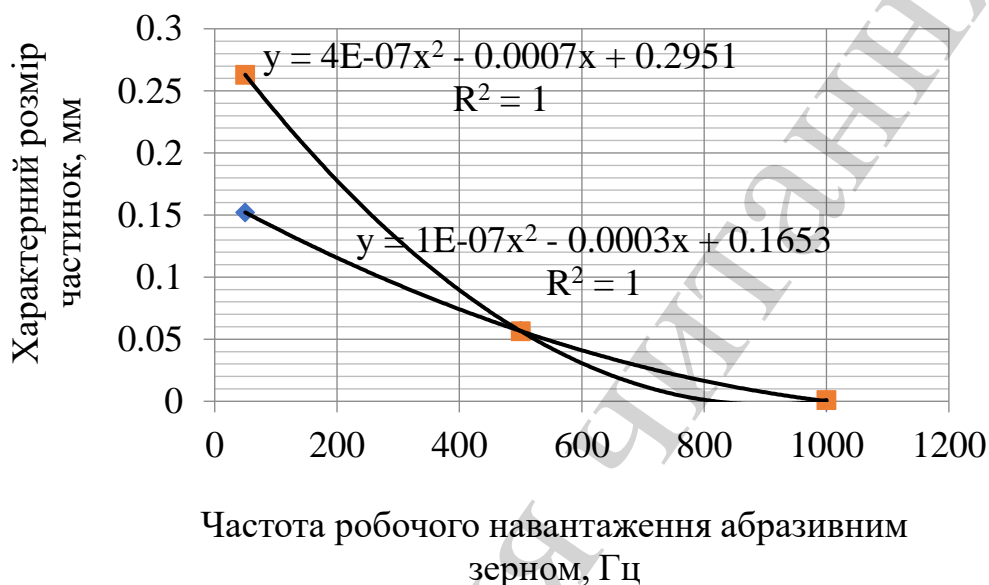


Рис. 12. Зміна очікуваних розмірів частинок шламу залежно від частоти робочого навантаження абразивним зерном

Отримані результати були взяті до уваги і за рівняннями (4), (13) побудовані криві виносу шламу із зони різання залежно від:

- амплітуди робочого навантаження A_p та його частоти H_p ;
- міжповерхневого проміжку l_p , обумовленого виступанням зерен над поверхнею та порожнистістю самого матеріалу;
- щільністю нанесення алмазних зерен на поверхню інструменту S_p .

Результати моделювання динаміки виносу частинок із урахуванням зворотно-поступового руху інструменту подано на рис. 13.

Розрахунок виконувався до моменту повного припинення винесення частинок за (11), тобто коли частинки максимально заповнили порожнину міжповерхневого зазору. K_1 відповідає частоті циклічної дії 50 Гц, K_2 – 50 Гц.

Зміна концентрації $K_i = f(t)$ встановлювалася із рівнянь (11), (13). Із результатів моделювання маємо, що найбільш ефективно винесення частинок спостерігається при коливаннях інструменту з невисокою частотою (в межах 30–50 Гц) з амплітудою коливань до 1–2 мм. З приведених діаграм можна бачити, що утворення частинок шламу не є сталим. Із плином часу виконання обробки очікується зменшення питомих показників продукування шламу

(рис. 13, а), при цьому концентрація утворених частинок шламу при обробці зростає випереджаюче (рис. 13, б).

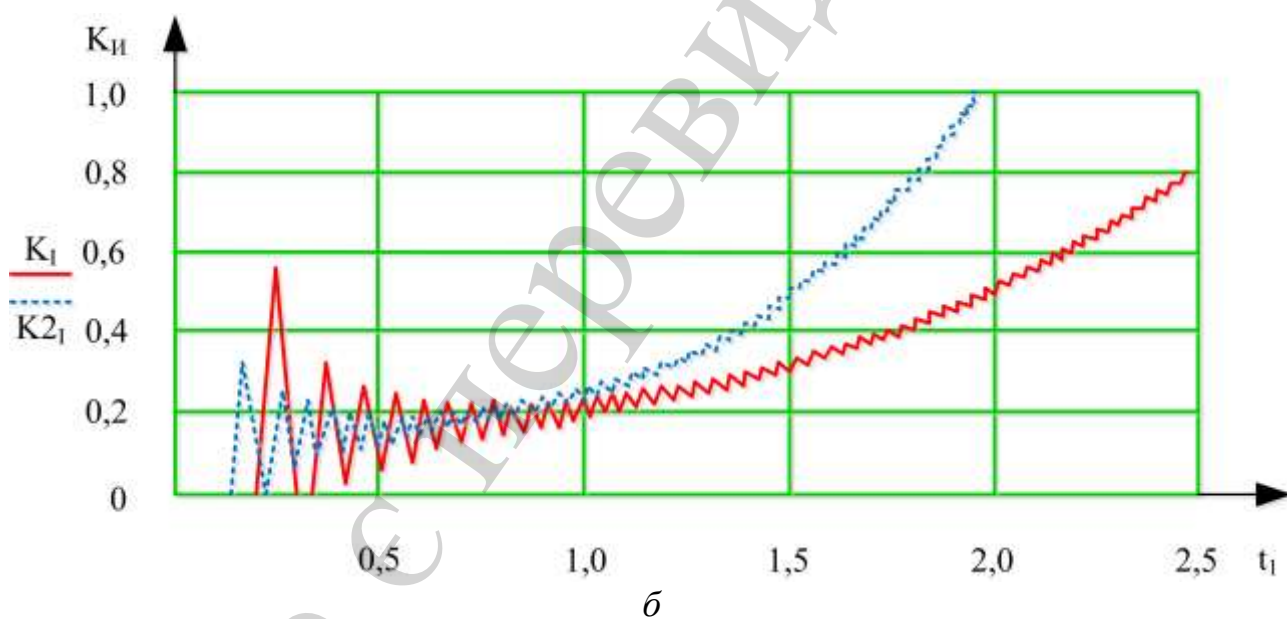
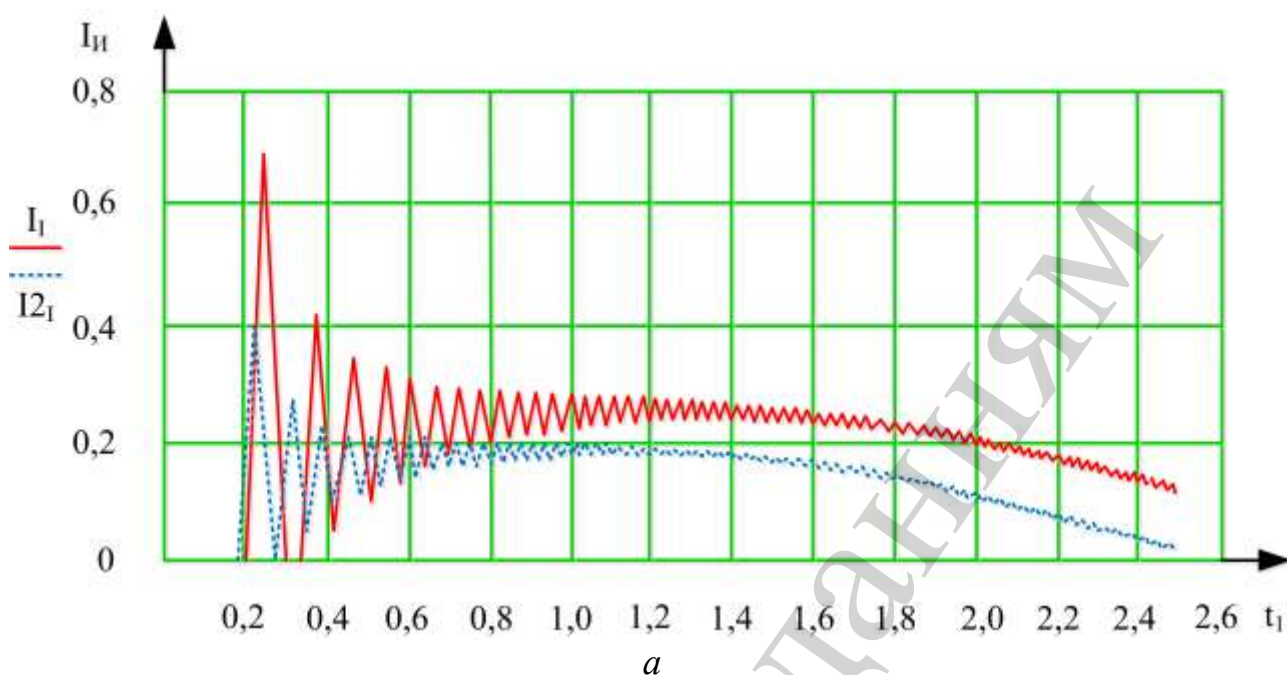


Рис. 13. Моделювання зміни інтенсивності утворення частинок шламу в міжповерхневому зазорі в розгортці на вісь часу t_1 : а – за кількістю I_u ; б – концентрації в проміжку

То ж очевидно, що по досягненні концентрації частинок у зазорі між поверхнею інструменту і поверхнею обробки певного рівня буде спостерігатися явище конгломератизації шламу, його активне налипання на поверхню.

Отже, обробка має здійснюватися так, щоб шламована речовина максимально повно видалялася за зону різання і не створювала передумов для зміни топографії робочої крайки інструменту.

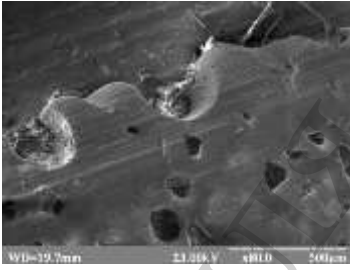
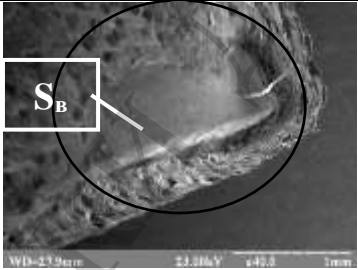
Отримані результати перевіряли на спеціальному оснащенні зі сполученими електричним машинами, що дозволило перевірити отримані результати при свердлуванні отворів у виробх із матеріалу КИМФ [15].

Для обробки використовували свердла рис. 9, б, які експлуатували до повного пошкодження (табл. 3). При цьому оцінювали час стійкості T та параметри дефектів до настання критичного стану свердла. Порівнювали роботу із циклічною подачею та без неї. при проведенні контролю перевіряли:

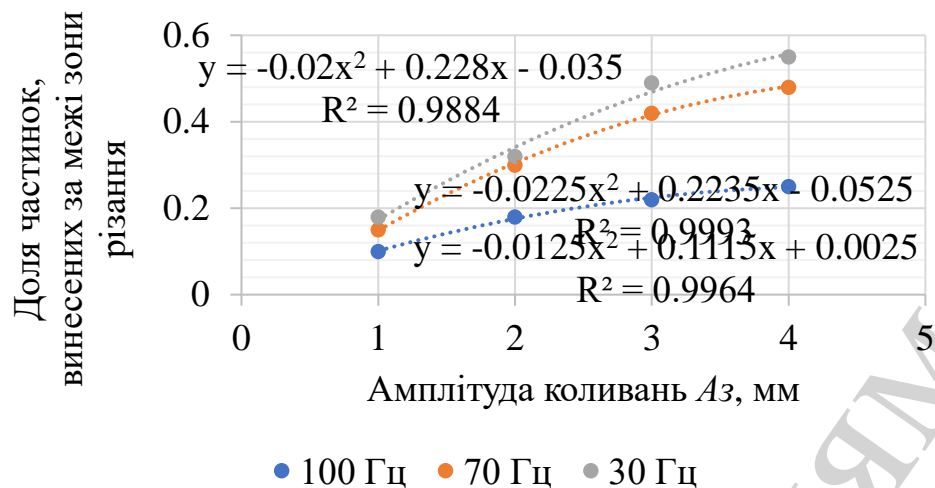
- наявність пошкодження алмазовмісного шару та відносну площу ділянок викрошування зерен характеризує коефіцієнт k_{oa} ;
- наявність ділянок пошкодження підложки, k_{sb} ;
- наявність порушення адгезійного зчеплення підложки із основою k_{sp} .

Таблиця 3

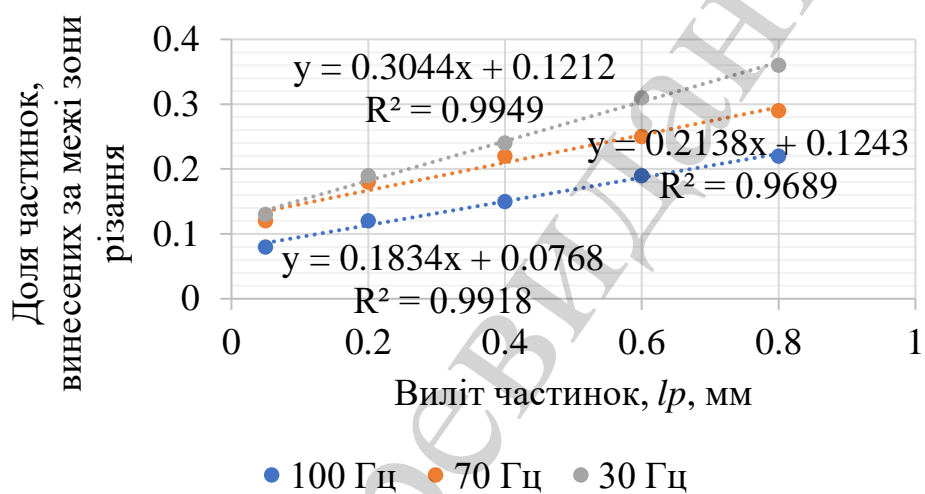
Типові дефекти використовуваних кільцевих свердел (товщина алмазного шару 0,1 мм, концентрація зерен 54–62 од/см², розмір зерна 0,13–0,15 мм)

№ з/п	Тип дефекту	Приклад	Контрольований параметр	Кількість дефектів	
				З помст. подачею	З цикл. подачею
1	Наявність пошкодження алмазовмісного шару та відносна площа ділянок викрошування зерен		$k_{oa} = \frac{N_a}{N_{cep}} = \frac{22}{58} = 0,379$	2	8
2	Наявність ділянок пошкодження підложки		$k_{sb} = \frac{S_b}{S_o} = \frac{7}{320} = 0,022$	2	5
3	Наявність порушення адгезійного зчеплення підложки із основою		$k_{sp} = \frac{S_p}{S_o} = \frac{18}{320} = 0,056$	1	4

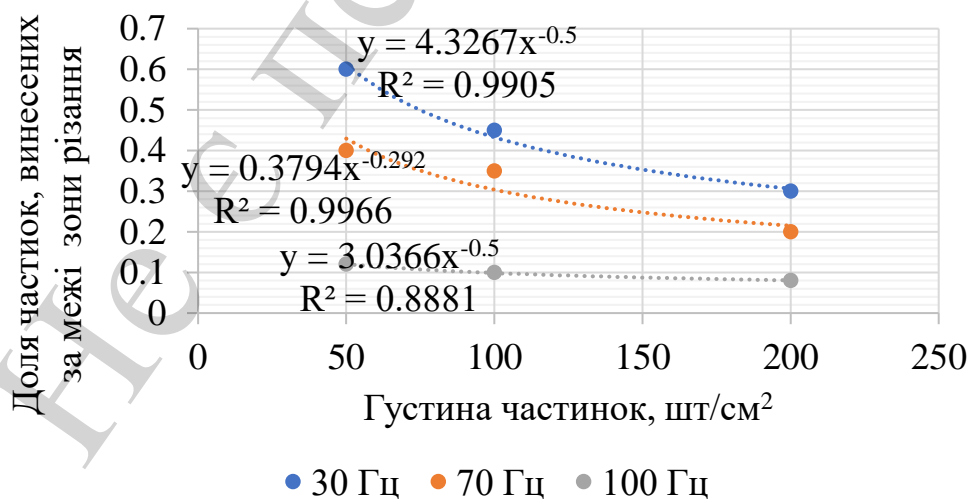
Отримані діаграми впливу амплітуди коливань робочої поверхні інструменту, вильоту алмазних зерен та щільності розташування зерен на явища виносу частинок шламу за межі зони різання (рис. 14) тотожні теоретичним положенням, відображеним, зокрема, на рис. 7.



a



б



в

Рис. 14. Вплив окремих чинників на явища виносу частинок за межі зони різання: *a* – амплітуда коливань (поліноміальна); *б* – виліт частинок (лінійна); *в* – густина частинок (степенна)

Окрім того, визначали також і щільність забруднення поверхні інструменту шламом оброблюваного матеріалу. Обробку виконували циклами по 1,0 хв, не допускаючи виникнення щільного поверхневого забруднення.

Порівнюючи встановлену експериментально площу контакту з розрахованою теоретичною s_t за методикою для випадку різання з поступальною подачею, отримали щільність забруднення поверхні інструменту ψ_k , $y_k = s_t / \bar{s}$. При цьому дослідженню піддавали різні конструктивні виконання інструменту. Результати подані у табл. 4.

Таблиця 4

Розрахунок площі контакту s_i за встановленими параметрами F_p і T_i

№	Параметри процесу		s_i	\bar{s}	s_t	ψ_k	ψ_k	ψ_k	ψ_k
	F_p , Н	T_i , К							
Новий інструмент $\tau=5$ хв роботи									
1	82	610	96,2	92,23	186,0	0,495	0,458	0,431	0,473
2	84	599	89,3						
3	75	570	92,6						
4	79	575	90,8						
Після $\tau=15$ хв роботи									
1	101	670	104,2	103,87	186,0	0,558	0,492	0,45	0,512
2	98	660	102,8						
3	95	675	105,3						
4	97	665	103,2						
Після $\tau=30$ хв роботи									
1	110	702	110,4	110,42	186,0	0,593	0,502	0,501	0,554
2	108	690	108,1						
3	118	700	112,3						
4	121	685	110,9						
Після $\tau=45$ хв роботи									
1	149	750	116,7	118,8	186,0	0,643	0,525	0,552	0,584
2	146	730	118,5						
3	153	745	119,2						
4	164	732	120,8						

Виміри контрольованих величин і розрахунок параметру ψ_k дозволили побудувати залежність останнього у функції часу (рис. 15). Видно, що дана залежність задовільно описується лінійною регресійною моделлю виду $y=b_0+b_1x$.

Таким чином, встановлено закономірність зміни щільності поверхневого забруднення і показано, що параметр відносного забруднення (що дорівнює відношенню площі контакту нового інструменту до площі контакту інструменту, який відпрацював певний час) практично лінійно зростає у функції часу. Ріст забруд-

нення веде до підвищення температури та силового навантаження плями контакту, що за певних умов може викликати пошкодження як інструменту, так і оброблюваної деталі. При цьому слід зазначити, що зменшення виступання зерен над поверхнею вестиме до скорочення кількості винесених частинок за рахунок зменшення миттєвої концентрації шламу. Зменшення ефективності видалення частинок шламу слід очікувати і при зростанні густини нанесення алмазних зерен.

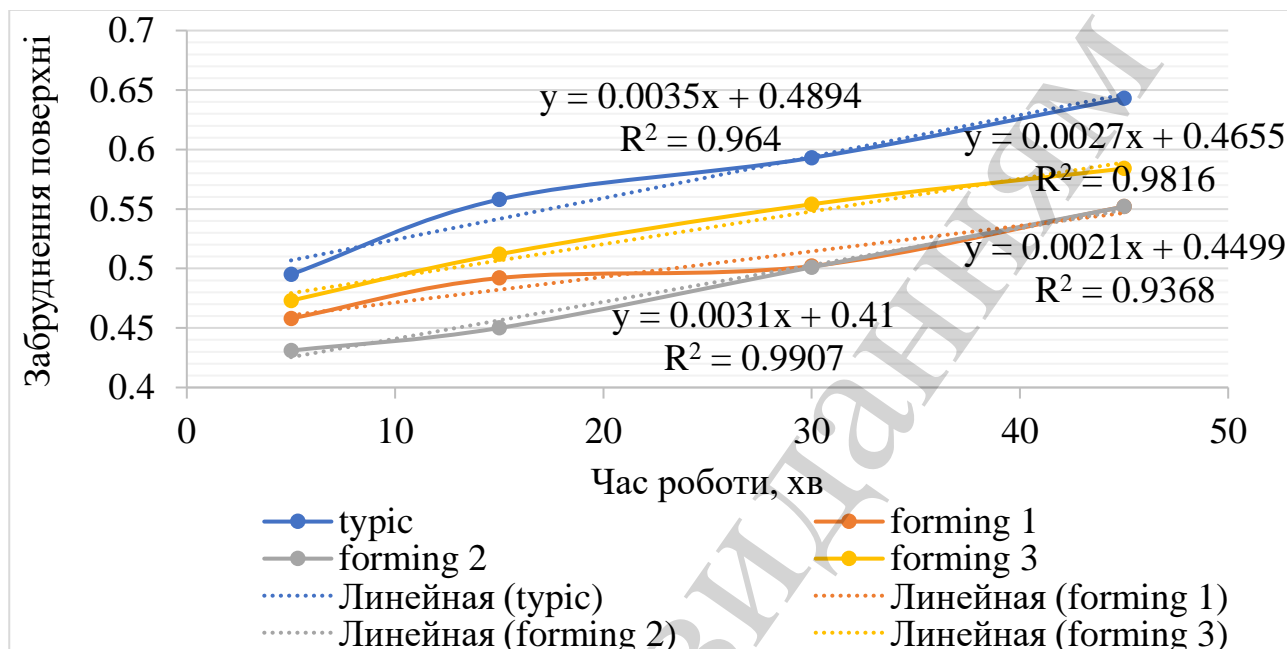


Рис. 15. Зміна ступеня забруднення поверхневого шару продуктами руйнування при обробці матеріалу КИМФ (параметра ψ) з плином часу

На рис. 15 також наведені результати досліджень ступеня забруднюваності інструментів із принциповими відмінностями алмазного шару, наприклад періодично відсутнім шаром (forming3), а також кластеризованими шарами (forming1, forming2). Із приведених діаграм можна зробити висновок, що зміна ділянок алмазоносного шару зменшує явище налипання частинок бруду на поверхню інструменту. Отже, інструмент довше залишається без забруднень і процес обробки здійснюється більш ефективно.

Таким чином, запропонований принцип формування абразивної поверхні у вигляді окремих кластерів є достатньо перспективним, оскільки дозволяє частково вирішити проблему поліпшення оброблюваності карбонових матеріалів за рахунок створення раціональних параметрів поверхневого шару інструменту. Подальші дослідження мають бути направлені на визначення ефектів адгезійного зчеплення частинок між собою, утворення конгломератів шламу, а також на пошук дієвих засобів для зниження поверхневої активності шламу.

6. Обговорення результатів досліджень визначення впливу пилоутворення на процес різання

Вивчення особливостей процесу абразивного різання карбон-карбонових композитів, явищ виникнення і поширення шламу і пилу, дослідження фрак-

ційності останнього та визначення чинників, що впливають на ефективність винесення продуктів руйнування із зони різання, дозволило не тільки розв'язати практичну задачу підвищення ефективності обробки, а і уточнити певні моменти щодо механіки руйнування такого класу матеріалів [16].

Використання підходу моделювання на основі ПСЕ та розгляд руйнування фрагментів матеріалу і заготовки в цілому як квазікрихкого тіла є дієвим засобом для опису взаємодії анізотропного середовища із твердим індентором, яким уявляли одиничне алмазне зерно. Це дозволяє зробити висновок щодо відповідності розмірів частинок шламу умовам зростання тріщин до їх біфуркації.

Опосередковано ідентифікація параметрів рівняння (1) також дозволить прогнозувати і товщину деструктивного шару, тобто шару, в якому тріщини утворилися, але не розвинулися до критичних значень (рис. 8). Так, звичайно, існують відмінності у розмірах частинок, обумовленні тим, що волокна при значних напруженнях, що виникають у зоні різання, можуть відокремлюватися від піровуглецевої матриці. Однак такі відмінності мають бути вивчені додатково, оскільки растрові дослідження мікроелектронних фото дають підстави вважати, що таких частинок не більше 5 %.

Звичайно, висловлені міркування стосуються матеріалів карбон-карбонової групи, що належать до КИМФ-матеріалів. Поведінка пластиків, у тому числі і на основі карбонових волокон, матиме певні відмінності, оскільки зв'язник вже не постає квазікрихким тілом, виявляючи більш пружно-пластичні властивості. Іншим моментом, який опосередковано враховує модель руйнування, є відмінність розмірів та розташування порожнин матеріалу. Слід також відзначити, що теплова модель таких особливостей не враховує взагалі (10). І знову ж таки, відмінність розрахованих значень температури, поданих на рис. 10, від значень, отриманих пірометром, становить 10–15 %, і має тенденцію до зростання при тривалому різанні.

Зважаючи на те, що в даному дослідженні показана обумовленість розмірів частинок та їх рух у зазорах температурою в точках контакту алмазних зерен із оброблюваним матеріалом (рис. 13), така похибка обумовлює деяку розбіжність між очікуваним ступенем пошкодження обраного інструменту (свердла кільцевого) при постійній подачі та при подачі зі зворотно-поступальним рухом.

Однак у той же час, безпосереднім важливим висновком може бути висновок щодо перспективності обробки інструментом із кластерами алмазного шару, що відрізняються певними ознаками (наприклад, чередуванням площин поверхні із різнонаправленими зернами, із зернами різної фракції та щільності укладання на поверхню, з смужками без зерен та ін).

Для будь-яких випадків необхідність врахування явищ шламовиділення є доцільною.

Таким чином, подальші дослідження повинні бути направлені на розробку інженерних методик прогнозування емісії шламу з отриманням простих регресійних рівнянь, створення засобів щодо підвищення ефективності видалення його із зони різання (і, відповідно, з поверхні інструменту), що значно підвищить ефективність оброблення матеріалів типу КИМФ.

9. Висновки

1. Отримано закономірності утворення пилу при обробці композиційних карбон-карбонових матеріалів та показано, що інтенсивність пилоутворення змінюється з часом, зі зменшенням при зростанні часу обробки. Розміри пилових частинок при використанні абразивного інструменту становлять 0,3–0,8 розміру алмазного зерна. Існує тісний кореляційний зв'язок між зусиллям, прикладеним до крайок інструменту (і, відповідно, напруженнями в зоні різання) та параметрами профілю поверхні: зростання силового впливу веде до прогресуючого зростання розмірів частинок шламу внаслідок деструкції зрізаного шару, а зменшення висоти виступання алмазних зерен збільшує дисперсність пилу.

2. Визначено вплив пило- та шламоутворення на зміну температури у зоні різання. Показано, що внаслідок погіршення винесення частинок пилу і шламу із зони різання відбувається їх активне залипання на поверхні інструменту, що змінює різальні властивості останнього, внаслідок чого зростає контактний тиск та температура на поверхні. Для незабрудненого інструменту протягом 2–2,5 хв його застосування температура на поверхні контакту починає сягати критичних значень понад 600–700 °С, що вимагає вживання заходів із більш ефективного вилучення частинок за межі зони різання.

Вуглецевий шлам у вигляді частинок піровуглецю та залишків армувальних волокон необхідно максимально повно видаляти із зони обробки, оскільки залишений на поверхні, він буде ущільнюватися, викликати збільшення площі контакту та вестиме до досить активного зростання температури зони різання, яка сягає 800 °С протягом 1,5–2 хв.

3. Прикладання циклічного навантаження до робочих крайок інструменту (в межах 30–60 Гц) дозволяє частково стабілізувати процес винесення пилу за межі зони обробки. Використання інструментів із циклічною подачею дозволяє частково поліпшити умови обробки матеріалу за рахунок винесення частинок шламу при коливаннях інструменту з невисокою частотою 30–50 Гц з амплітудою коливань до 1–2 мм, досягти збільшення часу до забруднення в середньому на 50–80 %.

4. Доведено, що зміна ділянок алмазоносного шару зменшує явище налипання частинок бруду на поверхню інструменту. Отже, інструмент довше залишається без забруднень і процес обробки здійснюється більш ефективно.

Література

1. Sheikh-Ahmad, J. Y., Davim, J. P. (2012). Cutting and Machining of Polymer Composites. Wiley Encyclopedia of Composites, 2, 648–658. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118097298.weoc061>
2. Bayraktar, S., Turgut, Y. (2016). Investigation of the cutting forces and surface roughness in milling carbon-fiber-reinforced polymer composite material. *Materiali in Tehnologije*, 50 (4), 591–600. doi: <https://doi.org/10.17222/mit.2015.199>
3. Wang, H., Sun, J., Li, J., Lu, L., Li, N. (2015). Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber-reinforced polymer composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82 (9-12), 1517–1525. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7479-2>

4. Venkatesh, B., Singh Sikarwar, R. (2018). Drilling of Carbon Fibre Reinforced Polymer Materials - A Review. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 8 (2), 157–166. doi: <https://doi.org/10.24247/ijmperdapr201817>
5. Geier, N., Davim, J. P., Szalay, T. (2019). Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, 105552. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105552>
6. Melentiev, R., Priarone, P. C., Robiglio, M., Settineri, L. (2016). Effects of Tool Geometry and Process Parameters on Delamination in CFRP Drilling: An Overview. *Procedia CIRP*, 45, 31–34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.255>
7. Pinho, L., Carou, D., Davim, J. (2015). Comparative study of the performance of diamond-coated drills on the delamination in drilling of carbon fiber reinforced plastics: Assessing the influence of the temperature of the drill. *Journal of Composite Materials*, 50 (2), 179–189. doi: <https://doi.org/10.1177/0021998315571973>
8. Ma, F. J., Zhu, X. L., Kang, R. K., Dong, Z. G., Zou, S. Q. (2013). Study on the Subsurface Damages of Glass Fiber Reinforced Composites. *Advanced Materials Research*, 797, 691–695. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.797.691>
9. Bonnet, C., Poulachon, G., Rech, J., Girard, Y., Costes, J. P. (2015). CFRP drilling: Fundamental study of local feed force and consequences on hole exit damage. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 94, 57–64. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.04.006>
10. Кириченко, А. Н., Аль-Ибрахим, М., Щетинин, В. Т., Ченчевая, О. А. (2018). Повышение качества абразивной резки карбон-карбоновых композитов за счет обеспечения рациональных условий динамического контакта. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 5 (112), 94–102. doi: <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2018.5.94-102>
11. Al-wandi Sinan, Ding, S., Mo, J. (2017). An approach to evaluate delamination factor when drilling carbon fiber-reinforced plastics using different drill geometries: experiment and finite element study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93 (9-12), 4043–4061. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0880-2>
12. Tsao, C. C., Hocheng, H., Chen, Y. C. (2012). Delamination reduction in drilling composite materials by active backup force. *CIRP Annals*, 61 (1), 91–94. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.036>
13. Ченчева, О. О., Саленко, О. Ф. (2014). Про доцільність використання сполучених обертових електричних машин у силових головках нового технологічного обладнання. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 4 (87), 111–118. URL: http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2014_4_111.pdf
14. Salenko, A., Chenchewa, O., Lashko, E., Shchetynin, V., Klimenko, S., Samusenko, A. et. al. (2018). Forming a defective surface layer when cutting parts made from carbon-carbon and carbon-polymeric composites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (94)), 61–72. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139556>

15. Kuznietsov, V., Shinkarenko, V. (2011). The genetic approach is the key to innovative synthesis of complicated technical systems. Journal of the Technical University at Plovdiv, Bulgaria Fundamental Sciences and Applications, 16, 15–33. URL: http://www.tu-plovdiv.bg/Container/journal/journal_V16_book2.pdf

16. Salenko, A., Chencheva, O., Lashko, E., Shchetynin, V., Klimenko, S., Samusenko, A. et. al. (2018). Forming a defective surface layer when cutting parts made from carbon-carbon and carbon-polymeric composites. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (1 (94)), 61–72. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139556>